

Optimisation de la forme temporelle des impulsions laser pour une combinaison donnée de matériau et de procédé laser industriel

Les lasers sont utilisés dans des procédés industriels, notamment la découpe de métaux et la soudure, depuis 40 ans. Ils sont également de plus en plus déployés dans la fabrication de dispositifs de haute technologie, notamment parce que les procédés laser peuvent être aisément automatisés et que des dimensions de motifs usinés de l'ordre de quelques micromètres seulement sont réalisables et ce, sur de grandes surfaces. Les procédés laser sont également, en général, moins dommageables pour l'environnement que les procédés traditionnels de microfabrication tels que développés pour l'industrie de la microélectronique, lesquels impliquent de nombreux produits chimiques. C'est pourquoi, par exemple, on les retrouve de plus en plus dans les procédés de fabrication des panneaux photovoltaïques.

Un laser se caractérise essentiellement de la façon suivante:

- son régime d'opération (continu ou impulsionnel);
- sa longueur d'onde;
- sa polarisation;
- sa puissance moyenne;
- son taux de répétition (dans le cas impulsionnel);
- l'énergie par impulsion (déduite de la puissance moyenne et du taux de répétition);
- la durée des impulsions;
- le profil temporel des impulsions;
- le profil spatial du faisceau.

Dans la plupart des cas, ces caractéristiques sont fixes pour un laser donné et elles ne peuvent être ajustées. Pour un procédé donné, on peut ajuster de façon externe (à l'aide de divers éléments optiques) la puissance moyenne du laser et la taille du faisceau laser au point d'usinage. On peut aussi avoir un certain contrôle sur la polarisation du faisceau. Enfin, certains lasers permettent un ajustement du taux de répétition. Ainsi, traditionnellement, lorsqu'on développe et optimise un procédé laser, on doit choisir un laser disponible sur le marché puis optimiser le procédé à travers les deux ou trois paramètres qui peuvent être ajustés avec ce laser. Conséquemment, à la fin

de ce processus, rien n'indique que le procédé développé soit optimum pour le matériau à traiter par laser.

Dans un procédé laser, l'énergie émise par le laser est absorbée par le matériau à traiter. Une transformation du matériau s'ensuit à travers des changements de phase thermodynamique (e.g. fusion, vaporisation, émission de plasma). Le contrôle des paramètres du laser permet donc, en principe, de se déplacer de façon déterminée dans le diagramme de phase d'un matériau donné. Ainsi, on peut aisément imaginer que la durée et le profil temporel des impulsions laser soient différents pour un procédé de fusion (e.g. polissage, soudure) ou de vaporisation (e.g. usinage de tranchées pour la fabrication de moules) d'un matériau donné. Mais il en est de même pour des matériaux différents (acier inox, aluminium, cuivre, silicium) pour un procédé donné.

Cette capacité à contrôler et à optimiser l'interaction laser-matière à travers l'ajustement de la forme temporelle et de la durée d'impulsions a été démontrée par certains groupes de recherche pour le cas de lasers à impulsions ultra-brèves (quelques dizaines de femtosecondes à quelques dizaines de picosecondes), notamment pour

- l'ablation du silicium (où l'on cherchait à optimiser la rugosité de surface ablatée par laser);
- l'inscription de guides d'onde optiques en volume dans les verres (où l'on cherchait à contrôler l'indice de réfraction du matériau modifié localement par laser).

Dans ce cas particulier, le contrôle des paramètres temporels des sources laser à impulsions ultra-brèves se fait à travers le contrôle du spectre des impulsions émises par le laser. Ces groupes de recherche ont utilisé, pour ce faire, des approches d'optimisation basées sur des techniques adaptatives (recuit simulé, simplexe, approche évolutive, etc.).

Assez récemment sont apparues sur le marché de nouvelles sources laser à fibre basées sur une architecture MOPA (Master Oscillator – Power Amplifier). Cette configuration permet d'avoir un contrôle électronique quasi-total sur la forme temporelle, la durée et le taux de répétition des impulsions émises par une diode laser, impulsions qui sont ensuite amplifiées dans une fibre optique dopée. SPI Lasers et Multiwave (durée et taux de répétition des impulsions ajustables en régime nanoseconde) de même que ESI-Pyrophotonics (forme temporelle, durée et taux de répétition des impulsions ajustables en régime nanoseconde) comptent parmi les fournisseurs commerciaux de tels lasers.

L'INO a développé sa propre plateforme laser permettant de pousser plus loin ce type de contrôle sur les impulsions laser. Ainsi, il est possible, avec la source laser de l'INO, de

- contrôler le taux de répétition des impulsions de quelques dizaines de kHz à 1 MHz;
- définir la durée des impulsions, en régime nanoseconde, de 2,5 ns à 640 ns avec une résolution (bin) de 2,5 ns;
- définir arbitrairement l'enveloppe temporelle des impulsions, en régime nanoseconde, sur 1024 niveaux (10 bits) pour chaque bin de 2,5 ns;
- définir des trains d'impulsions en régime nanoseconde (durée des impulsions de quelques nanosecondes à quelques dizaines de nanosecondes) en mettant certains bins à zéro à l'intérieur de l'enveloppe temporelle définie arbitrairement (voir ci-dessus). En conséquence, à l'intérieur du train, les impulsions peuvent être espacées dans le temps de façon arbitraire (avec une résolution de 2,5 ns). Chaque train d'impulsions a donc une durée totale ajustable inférieure à 640 ns mais peut se répéter à un taux ajustable (défini plus haut) de quelques dizaines de kHz à 1 MHz;
- définir des trains d'impulsions en régime picoseconde selon la méthode décrite ci-dessus. Dans ce cas particulier, toutefois, chaque bin de 2,5 ns est occupé (ou non) par une seule impulsion d'une durée ajustable de quelques dizaines de picosecondes à quelques centaines de picosecondes;
- de définir des trains d'impulsions en régime picoseconde (durée d'impulsion de quelques dizaines de picosecondes) à très haut taux de répétition (1 à 10 GHz) ayant une enveloppe temporelle définie arbitrairement (voir ci-dessus), chaque train d'impulsions picosecondes ayant une durée totale inférieure à 640 ns mais se répétant à un taux ajustable (défini plus haut) de quelques dizaines de kHz à 1 MHz.

Tous ces paramètres sont ajustables par l'utilisateur du laser à l'aide d'une interface logicielle. On obtient ainsi une plateforme très polyvalente capable de reproduire à elle seule les caractéristiques de nombreux lasers commerciaux.

Tel qu'indiqué plus haut, la façon usuelle de procéder pour optimiser un procédé laser consiste à varier les paramètres ajustables, peu nombreux, d'un laser commercial donné. On peut donc bâtir un plan d'expériences puis procéder à une analyse statistique des résultats des essais expérimentaux afin de déterminer la valeur de chaque paramètre permettant d'optimiser le procédé laser. Lorsque d'autres paramètres que ceux qui sont reliés au laser peuvent être ajustés (e.g. la pression d'un jet de gaz ajouté au procédé, la température et la pression ambiante, etc.), on peut réduire le nombre d'expériences nécessaires en mettant en oeuvre certaines approches connues de planification d'expériences (Design of Experiment), telle la méthode de

Taguchi. Cependant, dans tous les cas, le nombre de paramètres ajustables étant limité, rien n'assure que le procédé laser considéré sera réellement optimal pour un matériau donné. Une plateforme telle que celle de l'INO permet en principe de résoudre cette question.

Cependant, comment exploiter ce potentiel quasi-illimité de régimes impulsions différents créés par les diverses combinaisons de profils temporels (incluant les trains d'impulsions), de durées d'impulsions et de taux de répétition du laser, afin d'optimiser un procédé laser donné pour un matériau donné? Voilà le problème à résoudre. Le vaste espace de paramètres à explorer élimine de facto l'approche systématique traditionnelle et d'autres techniques d'optimisation doivent être considérées.

Dans le cadre de l'atelier de résolution de problèmes industriels du CRM, on pourra considérer un ou deux procédés laser particuliers, tels

- l'ablation laser de divers métaux ou du silicium (on cherche à maximiser la quantité de matière vaporisée par unité d'énergie des impulsions laser);
- le traitement de surface par fusion laser de divers matériaux (on cherche à minimiser l'énergie par unité de surface nécessaire à la fusion).

On pourra utiliser, pour ce faire, des modèles simplifiés (analytiques) de l'interaction laser-matière pour analyser l'effet des divers paramètres laser à optimiser sur le paramètre de contrôle (calculé à l'aide du modèle et éventuellement mesurable expérimentalement).

L'objectif, à la fin de l'atelier, serait d'avoir déterminé une approche, sinon un algorithme, pour l'optimisation de procédés laser ayant pour but de limiter le nombre d'expériences (qu'elles soient numériques, à l'aide d'un modèle d'interaction laser-matière, ou éventuellement réelles en laboratoire) nécessaires pour déterminer les paramètres laser appropriés.